

## АНАЛИЗ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.Д. Емельянов, к.т.н.  
 ЗАО «ЦНИИМФ»

В работе представлены данные о наиболее повреждаемых элементах главного судового двигателя в условиях эксплуатации. Выполнен анализ характерных видов отказов и причин их возникновения, показано влияние типа гребного винта на уровень повреждаемости элементов и систем главного двигателя. Приведенные данные основаны на результатах обработки базы данных Российского морского регистра судоходства об аварийности двигателей морских судов за период 1998–2007 гг.

Основная цель настоящей работы состоит в получении количественной оценки частоты отказов основных элементов главного двигателя в рейсе. Это, с одной стороны, выявляет приоритеты для обеспечения надежности элементов двигателя и, с другой стороны, позволяет рассчитать возможные последствия аварийных случаев.

Так, например, поломка гребного вала на танкере вьетнамской постройки дедвейтом 3500 т, перевозящего сырую нефть с морского месторождения Вах Но на нефтеперерабатывающий завод в центральной части Вьетнама на расстоянии 500 км привела к убытку, в 6 раз превышающему затраты на его плановую замену. Последствия отказа на судне с одним главным двигателем топливного насоса высокого давления (ТНВД) в отсутствие запасного показали, что его стоимость ничтожна по сравнению с затратами на буксировку судна в порт и оплату издержек, связанных с задержкой в доставке груза.

Приведенные в статье данные основаны на результатах обработки содержания актов об внеочередном освидетельствовании судна в связи с аварийным случаем, составленных Российским морским регистром судоходства за период с 1998 по 2007 гг.

Данные охватывают 240 аварийных случаев (АС), приходящихся на объем выборки 35 023 судолет\* при эксплуатации среднеоборотных главных двигателей судов следующих типов: сухогрузные, наливные, навалочные, накатные, контейнерные, рефрижераторные, пассажирские и гру-

зопассажи́рские, суда флота рыбной промышленности.

Результаты вычисления частоты АС для одного двигателя относятся к сроку службы судна в целом и имеют размерность (судолет<sup>-1</sup>). При наличии на судне двух главных двигателей для определения частоты отказов одного из них необходимо приведенные данные разделить на два.

В процессе обработки актов о внеочередном освидетельствовании судна в связи с АС были выявлены критичные элементы, отказ которых приводил к аварийному случаю.

Для удобства анализа часть критичных элементов главного двигателя по условиям работы и действующим нагрузкам были объединены в следующие группы:

- цилиндропоршневая группа (ЦПГ);
- силовые элементы (блок шатун, коленчатый вал, элементы крепления крышки блока цилиндров и фундаментной рамы, демпфер крутильных колебаний, эластичная муфта);
- коленчатый вал, опорные подшипники коленчатого вала (шатунный и рамовый);
- распредвал, приводы распредвала и навесных насосов;
- выпускные и впускные клапаны, газотурбонагнетатель (ГТН);
- редуктор.

### Отказы ЦПГ

Наиболее характерными повреждениями поршня и цилиндровой втулки является: заклинка поршня или обрыв его юбки; прогорание головки поршня или появление в нем трещин; задиры зеркала цилиндровой втулки, ее предельный износ или обрыв, трещины в цилиндровой втулке.

В большинстве случаев эти повреждения связаны с нарушением температурного режима работы детали, вызванного как ошибками ремонта (несоблюдение зазоров, неправильно выполненный монтаж), или вследствие ошибок обслуживания (недостаточное охлаждение или недостаточная смазка, перегрузка двигателя или его отдельных цилиндров).

Известно, что параметром, определяющим тепловую напряженность деталей ЦПГ, является температура поршня на уровне первого компрессионного кольца. При высокой температуре происходит закоксование масла в кепах, из-за чего

\* В статистике отказов судовых дизелей объем выборки имеет размерность судолет (произведение количества судов на продолжительность наблюдения).

компрессионное кольцо теряет подвижность. В результате появляются задиры зеркала цилиндровой втулки, возможна поломка колец, появление трещин во втулке с протечкой воды из зарубашечного пространства, заклинка поршня с обрывом юбки, шатуна или цилиндровой втулки.

Следует отметить, что имеют место отказы вследствие механического повреждения деталей, вызванного разовым превышением внешней нагрузкой характеристик прочности материала и отказы, вызванные нарушением теплового баланса, которые имеют некоторую инерционность. То есть необходимо продолжительное время работы двигателя с тепловой перегрузкой, чтобы в кепках накопились продукты коксования масла, приводящие к потере подвижности компрессионных колец. Этот процесс в зависимости от степени тепловой перегрузки может занимать от нескольких часов до нескольких суток.

#### **Отказы силовых элементов**

Для силовых элементов характерны отказы в виде усталостных трещин в местах концентрации напряжений. Чаще всего они возникают из-за ошибок ремонта или изготовления деталей (отсутствие контроля при затяжке болтов крепления, неправильный монтаж или дефект изготовления) и вследствие перегрузки двигателя и наличия внутренних дефектов.

#### **Отказы опорных подшипников коленчатого вала**

Основным видом повреждения опорных элементов является износ вкладышей подшипников скольжения, их проворачивание и «схватывание» с шейкой вала, «задиры» и риски на шейке вала, усталостное разрушение антифрикционного слоя вкладышей.

В большинстве случаев эти повреждения вызваны ошибками обслуживания: низкое качество масла, кратковременная работа двигателя с недостаточной смазкой, а также отсутствие контроля за обтяжкой болтов крепления крышки подшипника, что при длительной эксплуатации может привести к самоотдаче болтов или к их обрыву.

Наибольшее количество отказов имело место вследствие нарушения условий смазки и ускоренного износа пар трения при невыработанном ресурсе. Сначала наблюдалось увеличение температуры подшипника, затем «дымление» масла (режим сухого или граничного трения), которое заканчивалось «схватыванием» вала с вкладышем, его выплавлением или проворачиванием. Другая характерная причина отказа — эксплуатация вкладышей с наработкой, существенно превышающей рекомендованную заводом-

изготовителем (в 2 и более раз), что приводило к усталостному растрескиванию и выкрашиванию материала вкладыша. Соотношение между отказами, вызванными первой и второй причинами, составляло приблизительно 10:1.

#### **Отказы распредвала, зубчатого привода распредвала и навесных насосов**

В подавляющем большинстве случаев отказы этой группы элементов были вызваны усталостным разрушением зубьев шестерен привода распредвала и навесных насосов (масляного, пресной воды, топливного и т. п.). Кроме того, встречались повреждения опорных подшипников распредвала, вызывающих его заклинивание, поломку вала или разрушение болтов его крепления.

#### **Отказы клапанов газораспределения и ГТН**

Для элементов газораспределения характерны следующие повреждения: обрыв тарелки клапана, поломка пружин, прогар выпускного клапана.

Основная часть повреждений происходила из-за усталостного разрушения штока клапанов в районе галтели перехода в тарелку. Как правило, они вызваны дефектами изготовления клапана, наличием внутренних дефектов в виде микротрещин и некачественным обслуживанием, а именно отсутствием контроля величины зазоров между штоком и направляющей, что приводит к появлению «забоин» на галтели штока клапана.

Основная причина повреждения ГТН — появление осевого люфта в подшипниках ротора, приводящего к износу лабиринтных уплотнений и лопаток.

#### **Отказы редуктора**

Основными видами повреждений редуктора являются усталостное выкрашивание или поломка зубьев шестерен, механический износ подшипников скольжения, разрушение сепаратора и обойм роликовых подшипников. В последнем случае причина отказа, как правило, связана с наработкой, существенно превышающей ресурс, рекомендованный заводом-изготовителем.

#### **Статистика отказов критичных элементов ГД**

Анализ данных по аварийным случаям выявил сильную зависимость частоты отказов от типа гребного винта (ВФШ или ВРШ) и относительно слабое влияние количества главных двигателей. В результате систематизирован и представлен перечень критичных элементов, и частота их отказов (см. табл. 1).

Отметим, что отказ одного критичного элемента может повлиять на работоспособность других элементов. Наиболее явно такая взаимосвязь проявлялась в случае отказов рамового и шатунного подшипников, а также и цилиндропоршневой группы (ЦПГ).

Таблица 1

**Частота отказов элементов ГД в зависимости от типа гребного винта (судолет<sup>-1</sup>)**

№ п/п	Наименование элемента	ВФШ	ВРШ
1	ЦПГ	0,00025	0,00125
2	Шатун	0,00008	0,00045
3	Коленвал	0,00029	0,00054
4	Рамовый подшипник	0,00050	0,00331
5	Шатунный подшипник	—	0,00260
6	Упорный подшипник	0,00029	0,00018
7	Привод распредвала и навесных насосов	0,00004	0,00099
8	Демпфер крутильных колебаний	0,00013	0,00018
9	Распредвал	0,00013	0,00063
10	Клапан газораспределения	0,00013	0,00018
11	Крепления крышки блока цилиндров и фундаментной рамы	0,00021	0,00018
12	ТНВД	0,00004	0,00036
13	Топливная система	0,00025	—
14	Масляный насос	—	0,00036
15	Масляная система	0,00008	0,00054
16	ГТН	0,00013	0,00018
17	Упругая муфта	0,00013	0,00018
18	Шестерни и валы редуктора	0,00021	0,00018
19	Подшипники редуктора	0,00004	0,00018
20	Масляный насос редуктора	0,00008	0,00018
21	Прочее	0,00042	0,00027
Итого:		<b>0,00381</b>	<b>0,01290</b>
Объем выборки, судолет		<b>23 861</b>	<b>11 162</b>

Например, отказ рамового подшипника на повреждение шатунного проявляется в том, что подача смазки в шатунный подшипник осуществляется через рамовые подшипники. В случае интенсивного износа вкладышей рамового подшипника продукты износа засоряют масляные каналы либо проворачивание рамового вкладыша может полностью их перекрыть, в результате чего нарушается условие нормальной смазки шатунного подшипника. Проворачивание шатунного вкладыша вызывает нарушение центровки поршня, которое проявляется в возникновении «натиров» и «задилов» цилиндровой втулки. В случае «задира» цилиндровой втулки поршнем возникает перегрев этой пары трения, который может привести к появлению трещин во втулке и попаданию охлаждающей воды в картер, а также к увеличению средних циклических нагрузок на шатунный подшипник. Это приводит к нарушению теплового баланса, и как следствие, становится причиной отказа шатунного подшипника.

Попадание воды в картер двигателя существенно снижает смазывающие свойства масла, что часто заканчивается выплавлением или про-

рачиванием вкладышей рамовых и шатунных подшипников.

Количественное выражение статистических показателей аварийности взаимосвязанных элементов может быть представлено матрицей влияния факторов (см. табл. 2). Таблицу следует читать построчно: например, вероятность отказа шатунного подшипника при отказе рамового подшипника составляет 0,421; при отказе пары трения «поршень-цилиндровая втулка» — 0,280.

Таблица 2

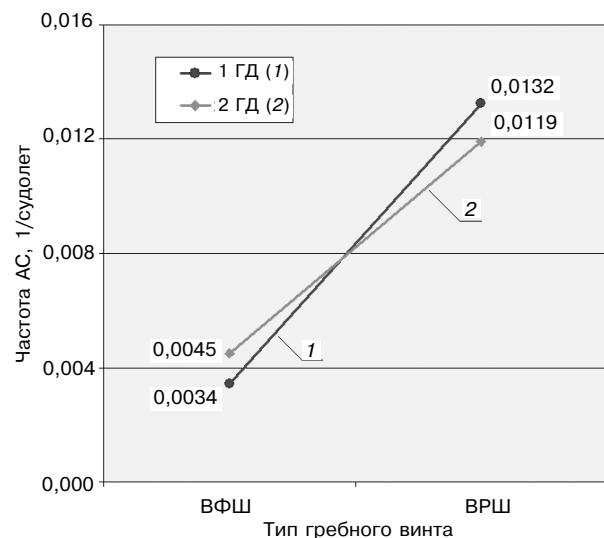
**Матрица влияния для ЦПГ, рамового и шатунного подшипников**

Критический элемент	Наименование элемента		
	Рамовый подшипник	Рамовый подшипник	ЦПГ
Рамовый подшипник	1	0	0,200
Шатунный подшипник	0,421	1	0,280
ЦПГ	0,018	0,087	1

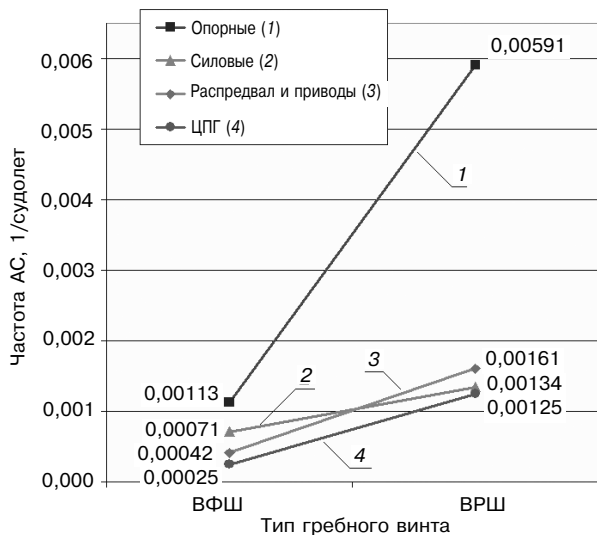
Анализ показал, что основное влияние на частоту отказов главного двигателя оказывает тип гребного винта (ВФШ или ВРШ) и в незначительной степени — положение линии валопровода (центральное или бортовое), что проиллюстрировано на рис. 1.

При работе двигателя на винт регулируемого шага частота отказов в среднем увеличивается в 3–4 раза (по всем видам отказов) по сравнению с работой на винт фиксированного шага. При этом повышенная повреждаемость при работе двигателя на ВРШ по сравнению с ВФШ наблюдается у всех рассматриваемых групп элементов. Графически эти зависимости представлены на рис. 2.

Влияние типа гребного винта на повреждаемость главного двигателя можно объяснить раз-



**Рис. 1. Повреждаемость главного двигателя в зависимости от типа гребного винта и положения линии валопровода**



**Рис. 2. Повреждаемость элементов ГД в зависимости от типа гребного винта**

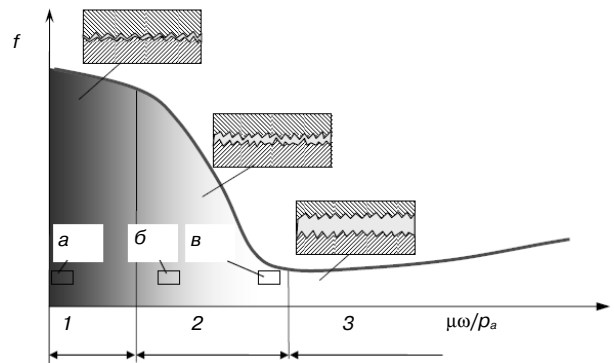
личием в особенностях работы систем управления двигателем (ДАУ) при работе на винт регулируемого и фиксированного шага.

Во-первых, отмечено, что при работе двигателя на винт регулируемого шага на малых ходах двигатель работает с более высокой частотой вращения, чем в случае работы на винт фиксированного шага по винтовой характеристике. Это приводит к более интенсивному расходованию моторесурса, измеряемого в количестве рабочих циклов дизеля.

Во-вторых, большинство существующих систем ДАУ предусматривает возможность в аварийной ситуации достаточно быстрого (в течение 10–15 с) изменения режима работы дизеля от малого до полного хода. Наибольшие нагрузки, как тепловые, так и механические, возникают при изменении направления движения судна с «хода вперед» на «ход назад» и наоборот, когда в силу инерции судна и набегающего потока воды гребной винт продолжает вращаться в режиме гидротурбины после прекращения подачи топлива.

В случае ВФШ изменение направления движения судна осуществляется (при отсутствии реверс-редуктора) реверсированием двигателя. При этом нагрузку плавно снижают до малого или самого малого хода, при котором двигатель должен проработать в течение нескольких минут, после чего прекращают подачу топлива. Только после полной остановки гребного вала дизель запускают на обратный ход. Таким образом, при работе двигателя на винт фиксированного шага реверс выполняется через 10 мин и более с момента снижения скорости хода.

При работе двигателя на ВРШ изменение режима и направления движения судна осуществляется за счет поворота лопастей гребного



**Рис. 3. Диаграмма Герси–Штрибека (зависимость коэффициента трения  $f$  от безразмерного параметра  $\mu\omega/p_a$  числа Герси, где  $\mu$  — динамическая вязкость смазки;  $\omega$  — угловая скорость;  $p_a$  — удельная нагрузка на узел трения):**

1 — область граничного трения; 2 — область полужидкостного трения; 3 — область жидкостного трения; а — переход от трения покоя к трению движения; б — переход от пластического деформирования микронеровностей к упругому; в — упругое взаимодействие микронеровностей

винта без остановки двигателя. Поэтому неопытные операторы могут выполнить маневр реверса за короткий срок, что в результате приводит к перегрузкам и более высокой повреждаемости главного двигателя.

Как следует из данных табл. 1, наиболее повреждаемыми элементами являются опорные подшипники коленчатого вала, что объясняется следующим.

При работе двигателя в стационарном режиме между валом и вкладышем подшипника образуется динамический несущий слой масла, который предотвращает взаимное касание выступов вала и вкладыша. В идеальном случае такая система может функционировать бесконечно долго при условии сохранения свойств смазочного материала. Однако при пусках и остановках двигателя, резком увеличении нагрузки, швартовке или изменении направления движения судна удельное давление в подшипнике существенно возрастает. Это приводит к снижению толщины масляного слоя и изменению режима смазки с жидкостного на полужидкостное или даже граничное, что приводит к интенсивному износу вкладыша. Взаимодействие поверхностей деталей характеризуется многократными контактами и хорошо согласуется с диаграммой Герси–Штрибека (см. рис. 3), заимствованной из работы [1]).

Поэтому износ опорных подшипников коленчатого вала в основном происходит на переходных режимах и многократно превосходит износ при работе двигателя на установившемся режиме.

В отличие от опорных подшипников, износ поршневых колец и цилиндрической втулки имеет

более сложный характер. В переходных режимах на «утяжеление» гребного винта вследствие возрастания инерционных нагрузок накладывается неравномерность прогрева деталей ЦПГ. Кроме того, в каждом цикле при прохождении поршня через мертвые точки происходит изменение направления и линейной скорости скольжения. В результате и на стационарных режимах, и при работе двигателя без нагрузки в режиме «холостого хода» имеет место изнашивание пары трения «поршневые кольца—цилиндровая втулка».

Таким образом, частота отказов главного двигателя в основном определяется как общим моторесурсом, так и долей перегрузочных режимов, вызывающих повышение удельного давления в подшипниках вследствие динамического «утяжеления» гребного винта и увеличения давления сгорания в цилиндре.

Анализ статистики отказов показал, что у двигателя, работающего на гребной винт регулируемого шага, частота отказов выше, чем у двигателя, работающего на винт фиксированного шага.

Снизить повреждаемость двигателя при работе на ВРШ можно путем ввода при проектировании дополнительного коэффициента запаса мощности. Такая задача может также решаться при минимизации затрат на стоимость жизненного цикла (СЖЦ) двигателя, включающего техническое обслуживание, ремонт и издержки из-за отказа в рейсе при некотором удорожании стоимости его изготовления.

#### Заключение

1. Анализ статистики аварийных случаев позволил выявить наиболее повреждаемые

элементы главного двигателя, среди которых в первую очередь следует выделить опорные подшипники коленчатого вала, привод распределительного вала и навесных насосов, коленчатый вал и цилиндропоршневую группу. Дано описание характерных видов отказов, причин их возникновения и характер взаимного влияния.

2. Показано влияние типа гребного винта на уровень повреждаемости главного двигателя, которая при работе на винт регулируемого шага в среднем в 3,4 раза выше, чем при работе на винт фиксированного шага.

3. Анализ характера и причин отказов опорных подшипников показал, что их ресурс работы определяется не столько усталостной прочностью материала вкладыша, сколько соблюдением условий смазки. В первом случае, как описывается в актах о внеочередных освидетельствований судна, эксплуатация вкладышей происходила при величине наработки, превышающей рекомендованную изготовителем. В остальных случаях отказ происходил при прогрессирующем нарушении теплового баланса из-за нарушения условий смазки (попадания воды или топлива в картер, снижения давления в масляной системе после фильтрации и т. п.) и выражался в форме выплавления материала вкладыша или «схватывания» его с валом.

#### Литература

1. *Шец С.П.* Изнашивание нестационарно нагруженных радиальных подшипников скольжения // Вестник Брянского гос. Техн. университета. — 2007. — № 1 (13). — С. 13–19.



НОВОСТИ ЗАО «ЭЛТОН»

### КОНДЕНСАТОРНАЯ СИСТЕМА ПУСКА ДИЗЕЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЛОКОМОТИВА

Полгода на станции Инская (Новосибирск) Запдно-Сибирской железной дороги три тепловоза ТЭМ18ДМ, оборудованные конденсаторной системой пуска (КСП) дизеля, работали в обычном для депо режиме. За это время разработчики — специалисты компании «ЭЛТОН» — учитывали замечания эксплуатационников и ремонтников депо и совершенствовали систему.

В результате эксперимента подтвержден стабильный и уверенный запуск дизеля. Зафиксированы запуски с первой попытки даже при сильно разряженной батарее, когда она была не в состоянии обеспечить нужное напряжение. Уже только эти факты вызвали большой интерес у железнодорожников к разработке компании «ЭЛТОН».

Электрохимические конденсаторы, которые составили основу конденсаторной системы пуска

тепловоза, в мире называли суперконденсаторами. Они имеют высокую запасаемую энергию, работают в широком диапазоне температур — от  $-50$  до  $+70$  °С, служат — и это неоднократно подтверждено испытаниями — до 1 млн зарядно-разрядных циклов.

Конденсаторная система пуска позволяет глушить дизель при простое в теплое время года, когда отсутствует необходимость прогрева двигателя. По предварительным расчетам за 140 дней эксплуатации при температуре воздуха выше  $+10$  °С, экономия топлива от остановки дизеля при технологических простоях составит от 3,5 т и более. Уменьшается расход моторного масла, увеличивается моторесурс дизеля, снижаются затраты на техническое обслуживание штатной аккумуляторной батареи, а срок ее эксплуатации увеличивается в два раза.